

Proyecto Fin de Carrera

INGENIERÍA INDUSTRIAL

MODELIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTES
ENERGÉTICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUA PARA RIEGO A PRESIÓN

MEMORIA

Autora

Carolina Calvo Calvo

Director/Ponente

D. Ricardo Aliod Sebastian/D. J. Ignacio García Palacín

EINA, Junio 2017

MODELIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTES ENERGÉTICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA RIEGO A PRESIÓN

RESUMEN

El presente proyecto presenta una metodología novedosa que explotando diversas técnicas de simulación y optimización del paquete informático GESTAR, dedicado al diseño y gestión de redes de distribución de agua a presión para riego, permite reducir significativamente el consumo energético en las redes colectivas de riego ya construidas mediante estrategias de adecuación de las infraestructura y de gestión de la demanda.

Para estudiar la viabilidad de la metodología se ha seleccionado un caso de aplicación real, que corresponde a la red de distribución el Sector XI del Flumen que consta de unas 600 tomas, repartidas en dos zonas con dos estaciones de bombeo de unos 1800 kW cada una, y abarca más de 3.900 ha, que por su complejidad supone un desafío a la aplicación de estas técnicas.

En primer lugar se procede a la búsqueda y depuración de la información proporcionada por la Comunidad de Regantes del Sector XI del Flumen (dotaciones, presiones de consigna y cotas de los hidrantes, longitud, material y diámetro de tuberías, características de las bombas, etc.) para a continuación crear un modelo hidráulico del sistema en la aplicación GESTAR.

A continuación se configura el modelo de simulación para poder reflejar con detalle todos los estados de demanda y condiciones de operación y regulación, que reproducen comportamiento real del sistema.

Con ayuda de este modelo, y los recursos de simulación del paquete GESTAR se analizan las diferentes estrategias de gestión en uno de los estados de operación de la red para obtener una red mejorada, dotada de mayor capacidad de transporte y adaptada a funcionar preferentemente en los periodos horarios donde las tarifas eléctricas son más económicas, lo que posibilitará reducir los costes energéticos mediante el proceso de organización de la demanda.

Finalmente se aplican las herramientas de optimización mediante algoritmos evolutivos que implementa GESTAR para la organización de peticiones de riego, es decir se organiza la demanda, para obtener un mínimo consumo energético, cuantificando estos ahorros y realizando un análisis coste-beneficio de los cambios propuestos.

Los resultados indican una alta eficacia de esta estrategia, que permite ahorros anuales en los gastos energéticos del 39%, y recuperación de la inversión en 5 años.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- PROBLEMÁTICA EN EL DISEÑO Y GESTION DE LAS REDES COLECTIVAS DE RIEGO A PRESIÓN	1
1.2.- PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA.....	2
1.2.1.- Elevación de las tarifas eléctricas	2
1.2.2.- Consecuencias en las redes de riego.....	2
1.3.- OBJETIVOS	3
2.- DESCRIPCIÓN DE ESTRATEGIAS	3
2.1.- ASPECTOS CRÍTICOS DEL COSTE ENERGÉTICO	3
2.2.- ESTRATEGIAS DE AHORRO ENERGÉTICO.....	4
3.- METODOLOGÍA.....	5
4.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO.....	6
4.1.- DESCRIPCIÓN DE LA RED	6
4.2.- ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SECTOR XI DEL FLUMEN.....	9
4.3.- CREACIÓN DEL MODELO DE LA RED EN LA APLICACIÓN GESTAR 2016	10
4.4.- ESTUDIO DE LAS MEJORAS ENERGÉTICAS APLICADAS EN LA ZONA SUPERIOR DE LA RED	11
4.4.1.- Etapa de simulación A	12
4.4.2.- Etapa de simulación B	13
4.4.3.- Etapa de simulación C.....	14
4.4.4.- Etapa de simulación D	14
4.5.- RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	16
5.- OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA RED MODIFICADA	16
5.1.- INTRODUCCIÓN	16
5.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS OPTIMIZACIONES	17
6.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	19

6.1.- ANÁLISIS DE LOS COSTES DE ENERGÍA.....	19
6.2.- ANÁLISIS DE LOS COSTES DE POTENCIA CONTRATADA	21
6.3.- ANÁLISIS DE LA AMORTIZACIÓN DE LOS CAMBIOS PROPUESTOS.....	22
6.3.1.- Situación 1: Amortización de las reformas insertando tuberías en paralelo.....	22
6.3.2.- Situación 2: Amortización de la red en fase de diseño.....	24
7.- CONCLUSIONES.....	25
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	26

ANEXOS

ANEXO 1: DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE RIEGO DEL SECTOR XI DEL FLUMEN

ANEXO 2: ANÁLISIS DE LA ZONA SUPERIOR DE LA RED DE RIEGO EN EL ESTADO 3

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Distribución de periodos horarios en la tarifa 6.1 a lo largo del año.....	4
FIGURA 2.	Ejemplo de salida de programación de riegos.	6
FIGURA 3.	Localización de la red de distribución.	7
FIGURA 4.	Esquema de la Zona Superior de la red de distribución del Sector XI del Flumen.	8
FIGURA 5.	Esquema de la Zona Inferior de la red de distribución del Sector XI del Flumen.	8
FIGURA 6.	Esquema de la red de distribución del Sector XI del Flumen.....	9
FIGURA 7.	Curvas características de altura de impulsión y de potencia consumida de la Estación de Bombeo.....	15
FIGURA 8.	Curvas características de altura de impulsión y de potencia consumida de la Estación de Bombeo reformada.	15
FIGURA 9.	Caudales de la estación de bombeo.	17
FIGURA 10.	Potencia en la estación de bombeo, en el riego optimizado en el mes de julio.....	19

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Características principales de las tuberías de la red.....	7
TABLA 2.	Variables que se deben introducir en los hidrantes.....	11
TABLA 3.	Resultados de la etapa de simulación A.....	13
TABLA 4.	Resultados de la etapa de simulación B.....	13
TABLA 5.	Resultados de la etapa de simulación C.....	14
TABLA 6.	Hidrantes que continúan siendo críticos en la red.	16
TABLA 7.	Resumen de las características de las optimizaciones según meses.....	18
TABLA 8.	Costes de energía en riego a demanda.	20
TABLA 9.	Costes de energía en riego optimizado.	20
TABLA 10.	Costes anuales derivados de la contratación de potencia según el período necesario.	21
TABLA 11.	Resultados obtenidos de los costes en los dos tipos de riego.....	22
TABLA 12.	Ahorro generado de la red optimizada.....	22

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- PROBLEMÁTICA EN EL DISEÑO Y GESTION DE LAS REDES COLECTIVAS DE RIEGO A PRESIÓN

Las redes colectivas de riego a presión, son sistemas de distribución de agua con destino a regadío que permiten la disponibilidad de agua a presión en cualquier toma de la red (que alimenta a parcelas de riego), en cualquier momento, sin pérdidas de agua por evaporación o filtración. Ésta capacidad facilita instalar sistemas de riego tecnificado (aspersión y goteo), que aportan el agua con mayor uniformidad y control, en todo tipo de terrenos y pendientes, flexibiliza la producción, y reduce el esfuerzo y mano de obra en las operaciones de riego, respecto a los sistemas tradicionales de riego por superficie de manera eficaz. Los sistemas de riego con redes colectivas de riego a presión, habitualmente se han gestionado mediante un uso de la red que se denomina “a la demanda”, solo posible con redes presurizadas. En el riego a demanda los usuarios tienen libertad para efectuar el programa de riegos que más le convenga, sin organización o supervisión previa, dando así flexibilidad y comodidad a la explotación. No obstante, cuando la presurización de la red requiere introducir bombeos directos con consumo de energía, la operación a la demanda no es la más aconsejable por los sobre costes en términos energéticos que involucra.

Hasta hace poco, la parte de ingeniería en los proyectos de redes de riego, se abordaba desde el punto de vista de la construcción, minimizando la importancia de la parte hidráulica y energética, por ello es importante entender que la operación de redes de riego encierra matices que la distinguen de los abastecimientos, algunos de los cuales se resumen a continuación.

- Se requieren caudal y presión elevados, debido a que las redes distribuyen grandes volúmenes a grandes distancias, con elevados niveles de presión a suministrar en los puntos de consumo, lo que implica gastos importantes asociados tanto a las instalaciones como a los costes energéticos. Dado que estos costes se reparten entre un reducido número de usuarios, su repercusión en las cuentas de explotación es muy significativa, por lo que resulta imprescindible ajustar los costes de inversión y de operación.
- Por otra parte, los puntos de consumo de las redes de riego son los hidrantes que alimentan una Unidad de Riego (también llamada Agrupación de Riego), compuesta por una o varias parcelas, de uno o varios explotadores, hidrantes afectados de un patrón temporal de demanda constante pero discontinua (no siempre existe consumo, y cuando el hidrante se encuentra abierto el caudal demandado es aproximadamente constante, por efecto de los elementos reguladores/limitadores del hidrante). Dado que las demandas de caudal de los hidrantes son relativamente importantes (entre 3 y 50 l/s), las decisiones individuales de riego son capaces de dejar sentir su influencia en amplias zonas de la red. Debido a ello, la acumulación de aperturas simultáneas de unos pocos hidrantes abiertos en un determinado ramal, por encima de las previsiones de diseño, puede hacer colapsar parte del sistema.

Puesto que existen necesidades de riego intermitentes y restricciones de riego en ciertos periodos horarios, es necesaria la existencia de sistemas de regulación especializados y gestión de los periodos de paro de la red o del riego.

- Cuando no existe suficiente diferencia de cota en el trazado para cubrir las necesidades de presión en cada uno de los hidrantes de riego que alimentan a una parcela se deben introducir bombeos, cuyo consumo de energía, dados los elevados caudales y presiones requeridas, es considerable y supone un coste de explotación que compromete la viabilidad de las instalaciones. Bombeos que deben contar con sistemas de regulación para encajar las muy diferentes demandas de caudal, y a veces de presión, que requiere la red y sus hidrantes a lo largo de la campaña de riego y de la jornada diaria.

1.2.- PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA

El regadío ha mejorado la eficiencia en el uso del agua y la flexibilidad y comodidad del riego gracias al empleo de riegos tecnificados alimentados por redes de distribución presurizadas, pero ha aumentado su dependencia energética, puesto que al reemplazar los sistemas de riego por lámina libre, dando paso a sistemas de riego a presión, muchas veces se precisa de presurización mediante bombeo, en una época de fuerte encarecimiento de la energía eléctrica.

1.2.1.- Elevación de las tarifas eléctricas

El Gobierno aprobó el 1 de julio de 2008 la desaparición de la tarifa especial de riego agrícola y la entrada en vigor de las subidas previstas en la Orden ITC/1857/2008 por la que se revisan las tarifas eléctricas y el coste del kWh pasa de 0,0483 €/kWh a 0,0912 €/kWh al tener que acudir al mercado libre. A comienzos de 2009 la parte regulada del término de energía (peajes) se incrementa considerablemente, sobre todo en los periodos P1 (85%) y en P2 (75%) (ver Proexport (2008)).

1.2.2.- Consecuencias en las redes de riego

- El funcionamiento de las redes de riego se tuvo que adaptar a las nuevas tarifas eléctricas, en consecuencia las instalaciones de riego tuvieron que reducir y reajustar las horas de funcionamiento si querían optar por las tarifas más baratas, aumentándose los caudales punta.
- Incremento en los costes fijos de la explotación, debido a que la cuota por contratación de potencia se paga todo el año a pesar de que el consumo eléctrico se produce de 4 a 6 meses, coincidiendo con la época de riego.
- Sobredimensionado de las nuevas instalaciones con incremento de los ya largos periodos de amortización.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

- Incremento en los costes variables de explotación por el aumento de la facturación en energía eléctrica.

1.3.- OBJETIVOS

El objetivo principal del presente proyecto es el de suministrar una metodología para la reducción de los costes energéticos en redes colectivas de riego a presión dirigida a la adaptación de instalaciones de riego en funcionamiento, que se ilustra y aplica en el “Sector XI del Flumen”, proporcionándole estrategias para optimizar, tanto el consumo eléctrico como el consumo de agua. Para ello se recurre a diversas herramientas de simulación y optimización de la aplicación informática GESTAR, (González et al. (2009)) desarrollada en la Escuela Politécnica Superior de Huesca, de la Universidad de Zaragoza, dedicada al diseño y gestión de sistemas de riego.

Gracias a la explotación inteligente de las herramientas proporcionadas por GESTAR, se desarrollará a lo largo del proyecto un análisis del funcionamiento actual del sistema en sus diferentes estados, y se proporcionan mejoras viables, debidamente justificadas mediante análisis técnicos y económicos, que consiguen un mejor aprovechamiento de la red y ahorros energéticos, que se traduce en economía de energía y gastos.

2.- DESCRIPCIÓN DE ESTRATEGIAS

2.1.- ASPECTOS CRÍTICOS DEL COSTE ENERGÉTICO

Haciendo un resumen cronológico, desde el año 2006 hasta julio de 2008 la tarifa R1 en los términos de potencia y energía se ve incrementada un 22% de media.

Cuando en julio del 2008 desaparecen las tarifas especiales de riego, el término de potencia y el término de energía se ven incrementados un 250% y un 15% respectivamente (De Palma (2016)).

Todos estos incrementos han supuesto un fuerte ascenso de los costes fijos de las instalaciones de riego presurizado, agravándose al mismo tiempo con el sistema de periodos establecido, en el que el coste del termino de potencia es diferente para cada uno de los 6 periodos en que se reparten los distintos meses del año, coincidiendo los periodos de mayor coste con aquellos en los que las instalaciones demandan una mayor cantidad de agua, con su consecuente elevada potencia. Esta situación se produce en los meses de junio y julio, abarcando el periodo más caro (P1) 8 horas del día, como se puede observar en la FIGURA 1.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO		JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
					1ª quincena	2ª quincena						
P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
P2	P2				P4	P2	P2		P4			P2
P1	P1	P4			P3				P3		P4	P1
P2	P2		P5	P5		P1	P1	P6		P5		P2
P1	P1	P3			P4				P4		P3	P1
P2	P2	P4				P2	P2				P4	P2

FIGURA 1. Distribución de periodos horarios en la tarifa 6.1 a lo largo del año. Yusta (2014).

En aplicación de la normativa, la potencia contratada en un periodo “n+1” no podrá ser inferior a la contratada en un periodo “n”, ($P1 \leq P2 \leq P3 \leq P4 \leq P5 \leq P6$), lo que implica que una vez establecida la contratación de potencia en el periodo P_n , el resto de tarifas n+i deberán ser iguales o superiores a esta, además de la misma todos los meses. Esta estructura de contrataciones supone un lastre para el regadío, puesto es preciso contratar potencia en todos los periodos todo el año, aunque solo durante 2 ó 3 meses las redes trabajen a potencia máxima, y durante el periodo noviembre a marzo no se haga uso del riego.

2.2.- ESTRATEGIAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Puesto que resulta prioritario para cualquier instalación de riego controlar al máximo la potencia contratada y el consumo de energía, se hace preciso gestionar el riego de una manera adecuada y llevar a cabo procesos de optimización de dicha gestión. Para ello es conveniente establecer estrategias generales a seguir:

1. Adecuación de las bombas y de los equipos de regulación (variadores de frecuencia) para mantener los rendimientos elevados en todos los regímenes de caudal.
2. Agrupar los hidrantes con mayores requerimientos de presión en los horarios de la tarifa más barata (P6), para reducir el gasto tanto del término de potencia contratada como del término de energía consumida en tarifas caras.
3. Ajustar los tiempos de riego de los hidrantes con requerimientos de presión más altas a 8 horas. Estos hidrantes regaran en el turno de noche, el motivo de aplicar esta estrategia no es otro que conseguir que los hidrantes con más necesidad de presión rieguen en la tarifa más económica P6 todo el año.
4. Para disminuir el tiempo de riego, se produce un aumento en la dotación de los hidrantes, esto se traduce en una mayor circulación de caudal por las tuberías afectadas, por ello se debe proceder al aumento del diámetro de algunas de las

tuberías involucradas por los cambios de dotación y que a consecuencia de los mismos sufran elevadas pérdidas de carga.

Todas estas estrategias se aplican en este proyecto y mediante un análisis de los costes necesarios y el ahorro conseguido, se llega a la conclusión de que su debida aplicación proporciona a los regantes un mejor funcionamiento de sus instalaciones y un más que notable ahorro.

3.- METODOLOGÍA

La metodología introducida aplica técnicas de simulación y optimización del paquete informático GESTAR, dedicado al diseño y gestión de redes de distribución de agua a presión para riego, con objeto de reducir los consumos energéticos de grandes sistemas de regadíos que se presurizan mediante bombeos directos. Para ello se adaptan e integran las estrategias descritas en el apartado anterior en el contexto de la aplicación GESTAR.

Los pasos a seguir se resumen a continuación.

- Fase previa: Crear el modelo hidráulico de la red, y las instalaciones de bombeo. Para este paso es imprescindible la colaboración con la Comunidad de Regantes, que proporciona la topografía de la red de riego, datos constructivos de las tuberías y la instalación de bombeo, los requerimientos de cada una de las parcelas, entre los que se encuentran la demanda del hidrante y la presión de alimentación mínima requerida en el del mismo, la superficie regada y los cultivos existentes.
- 1. Identificar los hidrantes de la red que necesitan mayores requisitos de presión para su correcto funcionamiento.
- 2. Identificar los hidrantes críticos, que son los que reciben una presión de la red, por debajo de la presión de alimentación mínima requerida (es decir que tienen un margen de presión negativo, variable definida como presión de alimentación menos presión mínima requerida).
- 3. Establecer tiempos de riego de 8 horas para los hidrantes críticos identificados en el paso 2, con el consecuente aumento de la dotación en estos ramales de la red, con objeto de que puedan regar en las horas nocturnas, donde la tarifa energética es más económica.
- 4. Aumentar capacidad de transporte para la alimentación de los hidrantes críticos, la cual se consigue aumentando el diámetro de determinados tramos de tuberías que conducen hasta ellos. En la práctica este objetivo se consigue mediante la colocación de tuberías en paralelo, cuya capacidad de transporte es tal, que añadida a la de las tuberías instaladas, alcanza la capacidad de transporte necesaria para la alimentación de los hidrantes críticos.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

- Reemplazar el tipo de riego a demanda por un riego organizado, donde la programación de riego se optimiza, de manera que los riegos se efectúen de acuerdo a una planificación preestablecida, en la que se logra tener presión suficiente al abrir los hidrantes con el mínimo coste energético posible, conseguido al seguir las estrategias anteriormente descritas.

Para alcanzar el riego optimizado, se generan programaciones de riego (franja horaria que se asigna a los hidrantes para regar) de los hidrantes como se ilustra en la FIGURA 2, proporcionadas por el módulo OPTIRIEGO, que las distribuye de manera que generen los mínimos costes energéticos.

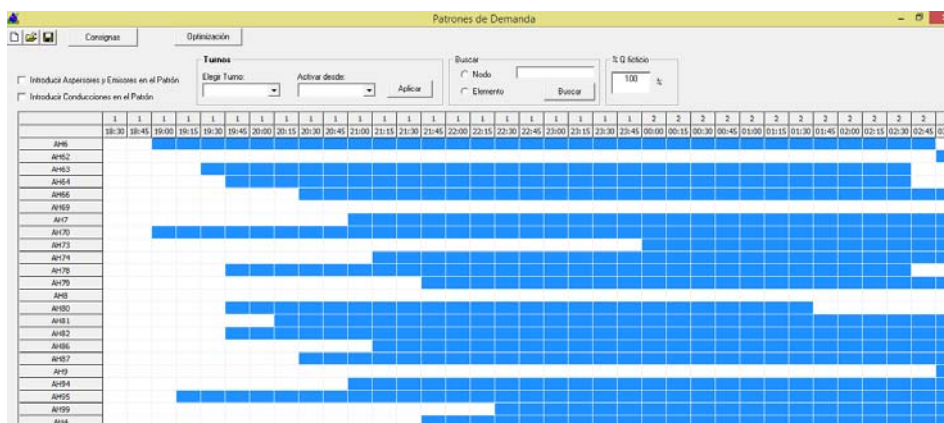


FIGURA 2. Ejemplo de salida de programación de riegos.

En la FIGURA 2 se observa que cada fila corresponde a un hidrante y cada columna a un instante de tiempo, las zonas coloreadas corresponden a los intervalos asignados para el inicio y final de riego de la petición.

- Valorar el coste real de los cambios de infraestructura en la instalación, que se realiza analizando el coste de añadir tuberías en paralelo en los tramos que se debe aumentar la capacidad de transporte (Véase Capítulo 4.1 del Anexo 2), y comparar con el ahorro conseguido por partida doble: al efectuar el mayor consumo de energía en el periodo más barato (P6), y al contratar con seguridad el mínimo de potencia en todos los periodos.

4.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO

4.1.- DESCRIPCIÓN DE LA RED

El presente proyecto analiza la red de distribución de agua a presión para riego del Sector XI del Flumen que abarca más de 3.900 ha distribuidas entre las localidades de Albalatillo, Capdesaso, Huerto, Lalueza y Sariñena (Véase zona sombreada de la FIGURA 3).

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.



FIGURA 3. Localización de la red de distribución.

La red de distribución está compuesta por:

- Estación de Bombeo 1: La estación dispone de 2 bombas pequeñas de 160kW con variador de velocidad, 1 bomba de 315kW con variador de velocidad, y 4 bombas con arrancador progresivo de 315kW.
- Balsa 1 situada a una cota de 333m.
- Estación de Bombeo 2: La estación dispone de 2 bombas pequeñas de 200kW con variador de velocidad, 1 bomba de 355kW con variador de velocidad, 3 bombas con arrancador progresivo de 355kW.
- Balsa 2: Situada a una cota de 304 m.
- Unos 600 hidrantes que están constituidos por una válvula hidráulica que integra pilotos limitadores de caudal, regulador de presión, y un contador de volumen.
- Elementos de control.
- Unas 600 tuberías, cuyas características principales se describen en la TABLA 1.

MATERIAL	TIMBRAJE (bar)	DIÁMETRO (mm)
Polietileno	Entre 8 y 12	Entre 125 y 710
Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV)	Entre 6 y 10	Entre 600 y 1200
Fundición	20	Entre 600 y 700

TABLA 1. Características principales de las tuberías de la red.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

La red de distribución colectiva del Sector XI del Flumen se divide en dos subzonas, Zona Superior (FIGURA 4) y Zona Inferior (FIGURA 5).

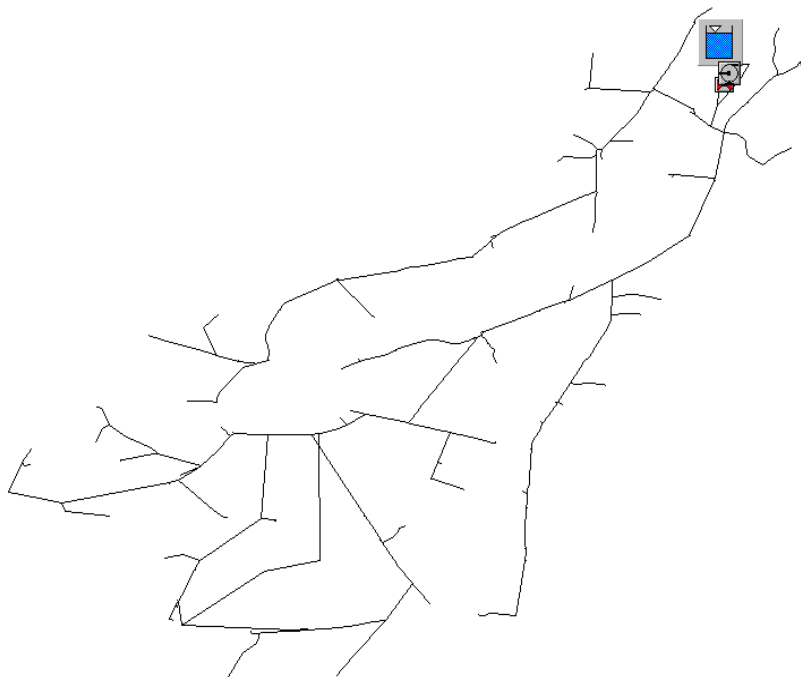


FIGURA 4. Esquema de la Zona Superior de la red de distribución del Sector XI del Flumen.

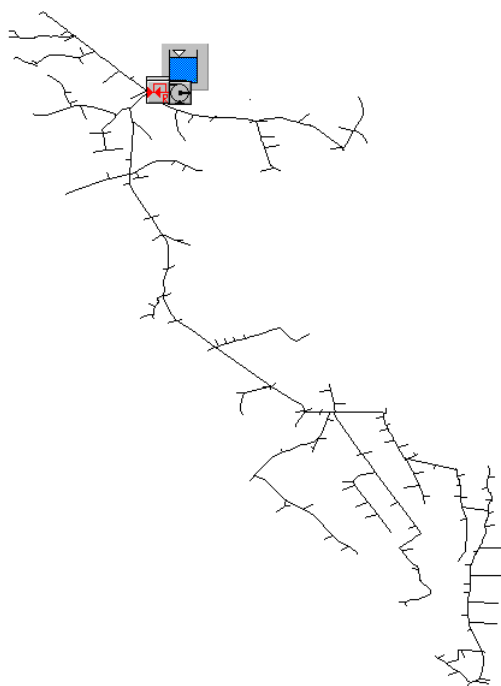


FIGURA 5. Esquema de la Zona Inferior de la red de distribución del Sector XI del Flumen.

4.2.- ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SECTOR XI DEL FLUMEN

El funcionamiento del Sector completo (FIGURA 6), responde a una serie de estados límite, puesto que se da una gran diversidad en las características de presión, dotación, cota, etc., de los elementos que componen la totalidad de la red. A continuación se realiza una breve descripción de los 3 estados de funcionamiento del Sector.

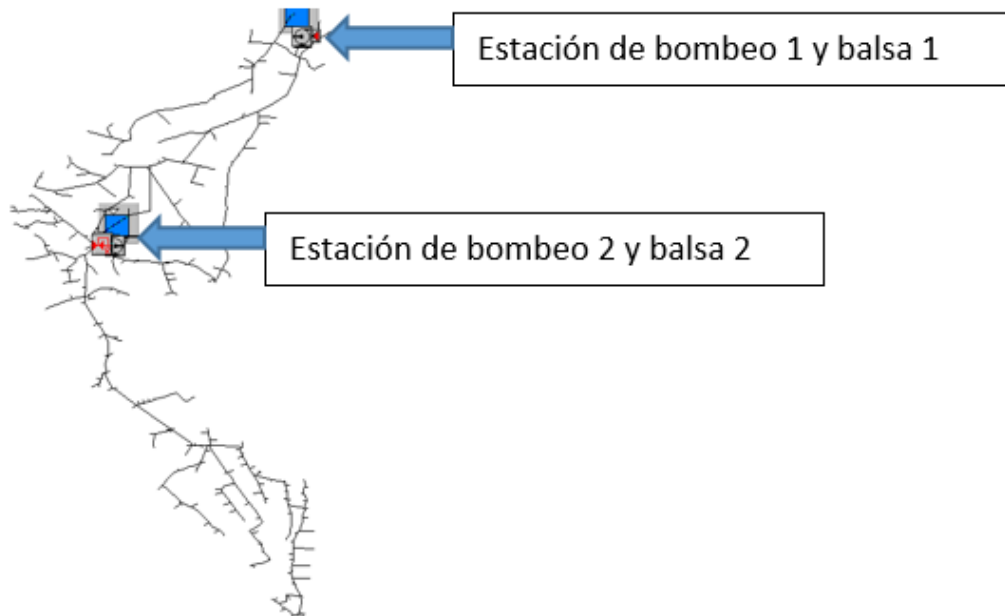


FIGURA 6. Esquema de la red de distribución del Sector XI del Flumen.

- ESTADO 1

También denominado estado de operación por gravedad, puesto que riega sin estar en funcionamiento ninguna de las dos estaciones de bombeo, aprovechando el desnivel del trazado desde la balsa.

El riego por gravedad riega en unos pocos hidrantes de la Zona Superior (FIGURA 4) y en la gran mayoría de hidrantes de la Zona Inferior (FIGURA 5), pero siempre desde la balsa de la Zona Superior.

En el Capítulo 3.1 del Anexo 1 se detallan las peculiaridades de funcionamiento del estado y los resultados obtenidos en su simulación.

- ESTADO 2

En este estado solo se pone en funcionamiento la Estación de Bombeo 1, la cual es capaz de regar ambas Zonas cuando hay poca demanda en la Zona Inferior.

En el Capítulo 3.2 del Anexo 1 se detallan las peculiaridades de funcionamiento del estado y los resultados obtenidos.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

- ESTADO 3

En este estado funciona cada una de las Zonas de manera independiente, es decir, la estación de bombeo 1 riega la Zona Superior y la estación de bombeo 2 riega la Zona Inferior.

El sistema pasa del Estado 2 al Estado 3 cuando detecta baja presión en la Zona Superior a través de una Válvula Sostenedora de Presión (ubicada a la salida de la Estación de Bombeo 2) que cierra el suministro de agua a la Zona Inferior desde el Bombeo 1. El cierre de la sostenedora implica que se active la Estación de Bombeo 2 y por lo tanto que en la Zona Inferior se riegue exclusivamente con el agua proveniente de la Estación de Bombeo 2.

En el Capítulo 3.3 del Anexo 1 se detallan las peculiaridades de funcionamiento del estado y los resultados obtenidos en la simulación del estado.

4.3.- CREACIÓN DEL MODELO DE LA RED EN LA APLICACIÓN GESTAR 2016

La introducción de los datos se realiza por medio de las herramientas gráficas, bases de datos y configuración del programa GESTAR, con el fin de crear el modelo hidráulico computacional de la red, intentando reflejar todos sus datos topográficos y constructivos.

Para facilitar esta labor, la aplicación GESTAR posee un módulo que permite al usuario conectar con la herramienta de dibujo AUTOCAD, disponiendo de este modo de una entrada de datos cartográficos apoyada en una aplicación específica y por lo tanto pudiendo perfilar un trazado semejante al real.

Una vez exportado el plano de la red a la aplicación GESTAR, se procede a introducir las variables que se incluyen en la TABLA 2 en todos los hidrantes de la red, y las propiedades de las tuberías (diámetro nominal, material, timbraje) incluidas en la base de datos de la aplicación GESTAR en cada una de las tuberías de la red.

VARIABLE	DEFINICIÓN
Dotación (m^3/s)	Consumo máximo de hidrante.
Superficie (ha)	Área Regada de la parcela desde el hidrante.
Rendimiento Operativo (Entre 0 y 1)	Cociente entre las duraciones real y teórica de la jornada de riego.
Caudal Ficticio Continuo (l/s ha)	Caudal que suministra las necesidades hídricas diarias, suponiendo una aportación ininterrumpida de agua a lo largo de las 24 horas del día.

TABLA 2. Variables que se deben introducir en los hidrantes.

4.4.- ESTUDIO DE LAS MEJORAS ENERGÉTICAS APLICADAS EN LA ZONA SUPERIOR DE LA RED

Para realizar la reforma y mejora del sistema, se aplican las condiciones de bombeo del Estado 3, y únicamente se analiza la Zona Superior (FIGURA 4), que es donde mejor se aprecian los efectos de reducción de costes que persigue el proyecto.

Se realiza una primera aproximación mediante sucesivas simulaciones de la red, para abordar los pasos 1 y 2 del Capítulo 3 de la Memoria. Realizando este análisis se identifican estos tres tipos de hidrantes:

- Hidrantes críticos: Aquellos hidrantes cuyo margen de presión es negativo. (Véase TABLA 1 del Capítulo 2.1 del Anexo 2).
- Hidrantes desfavorables: Aquellos hidrantes cuyo margen de presión es positivo, pero menor de 10 m.
- Hidrantes favorables: Aquellos hidrantes cuyo margen de presión es mayor de 15 m. (Véase TABLA 2 del Capítulo 2.1 del Anexo 2).

Una vez identificados estos hidrantes, para estudiar los casos más desfavorables, se configura la red estableciendo:

- Los hidrantes críticos permanentemente abiertos, para poder analizar su comportamiento en todas las simulaciones.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

- Los hidrantes favorables permanentemente cerrados, debido a que no es necesario analizar su comportamiento, puesto que no es estrictamente necesario que rieguen en la franja horaria nocturna.

Esta configuración de la red se mantiene en todas las simulaciones de estados de consumo que se analizan en este apartado, sin embargo en cada una de las simulaciones se llevaran a cabo las siguientes etapas para mejorar el comportamiento de la red.

- Paso 1: Localizar los hidrantes críticos.
- Paso 2: Sustituir el valor del caudal actual de los hidrantes críticos por el de una dotación superior, para conseguir que estos hidrantes rieguen en 8 horas, dotación obtenida aplicando la expresión:

$$Q_{\text{dotación}} (\text{m}^3/\text{s}) = \frac{q_{\text{ficticio}} \left(\frac{l}{s \cdot ha} \right) * Superficie(ha) * 24(h)}{8(h) * 1000 \left(\frac{l}{m^3} \right)}$$

- Paso 3: Realizar una nueva simulación con las dotaciones del paso anterior.
- Paso 4: Para solucionar los problemas derivados de las mayores pérdidas de carga en las tuberías por los aumentos de dotación, se debe proceder al aumento de los diámetros de las tuberías afectadas, es decir las que mayor pérdidas de carga presentan en la nueva simulación, para a su vez conseguir aumentar el margen de presión de los hidrantes afectados.

Los resultados de las diferentes etapas de simulación del Estado 3 se analizan más detalladamente en el Capítulo 2 del Anexo 2, pero se aporta un breve resumen con las conclusiones de cada una de las etapas de simulación (A; B; C; D) en los siguientes apartados.

4.4.1.- Etapa de simulación A

Los resultados de la etapa de simulación A, aplicando los pasos del apartado anterior se resumen en la TABLA 3 y se analizan más detalladamente en el Capítulo 2.2 del Anexo 2.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

PASO 1: HIDRANTES CRÍTICOS	PASO 2: Q_DOTACIÓN (m3/s)	PASO 3: HIDRANTES AFECTADOS POR EL AUMENTO DE DOTACIÓN	PASO 4: TUBERÍAS AFECTADAS	DIÁMETRO INICIAL TUBERÍA (mm)	DIÁMETRO FINAL TUBERÍA (mm)
H152	0,036	H152	ATU210	160	200
H1	0,070	H1	ATU209	315	355
H3	0,066	H3	ATU2	1.000	1.300
H52	0,040	H52	ATU265	500	550
H11	0,037	H11	ATU173	560	630
H5	0,021	H5	ATU258	250	355
		H133	ATU176	500	560
		H151	ATU178	400	450
			ATU179	400	450
			ATU180	400	450
			ATU298	250	315
			ATU187	250	315

TABLA 3. Resultados de la etapa de simulación A.

4.4.2.- Etapa de simulación B

Utilizando la red con conducciones ampliadas de la etapa de simulación A, se vuelven a aplicar los pasos para continuar mejorando la red, el resumen de los resultados obtenidos se describe en la TABLA 4 y se analizan más detalladamente en el Capítulo 2.3 del Anexo 2.

PASO 1: HIDRANTES CRÍTICOS	PASO 2: Q_DOTACIÓN (m3/s)	PASO 3: HIDRANTES AFECTADOS POR EL AUMENTO DE DOTACIÓN	PASO 4: TUBERÍAS AFECTADAS	DIÁMETRO INICIAL TUBERÍA (mm)	DIÁMETRO FINAL TUBERÍA (mm)
H151	0,033	H133	ATU174	560	630
H133	0,042	H152	ATU175	560	630
		H151	ATU176	560	630
			ATU177	450	560
			ATU178	450	560
			ATU179	450	560
			ATU180	450	500
			ATU181	400	450
			ATU182	400	450
			ATU188	160	200

TABLA 4. Resultados de la etapa de simulación B.

4.4.3.- Etapa de simulación C

Utilizando la red con conducciones ampliadas de la etapa de simulación B, se vuelven a reformar en sucesivas iteraciones las tuberías necesarias para continuar con las mejoras de la red, el resumen de los resultados obtenidos se describe en la TABLA 5 y se analizan más detalladamente en el Capítulo 2.4 del Anexo 2.

PASO 1: HIDRANTES CRÍTICOS	PASO 2: Q_DOTACIÓN (m ³ /s)	PASO 3: HIDRANTES AFECTADOS POR EL AUMENTO DE DOTACIÓN	PASO 4: TUBERÍAS AFECTADAS	DIÁMETRO INICIAL TUBERÍA (mm)	DIÁMETRO FINAL TUBERÍA (mm)
H162	0,038	H157	ATU249	250	560
C44	0,024	H163	ATU196	900	1.000
H157	0,05	H162	ATU253	160	250
H141	0,043	H39	ATU250	200	315
H163	0,034	C43	ATU251	160	315
C43	0,052	C44	ATU130	160	355
		H141			

TABLA 5. Resultados de la etapa de simulación C.

4.4.4.- Etapa de simulación D

En esta etapa de simulación se va a analizar el comportamiento del sistema, reduciendo el tiempo de riego a 8 horas de todos los hidrantes con un MP inferior a 10 m y que trabajen más de 8 horas.

En el Capítulo 2.5 del Anexo 2 se analizan todos los cambios efectuados en esta simulación, que como cabía esperar fueron muchos.

Debido a los cambios descritos en esta etapa de simulación, se produjo un aumento significativo de caudales en toda la red, por ello se tuvo que aumentar el caudal máximo de la Estación de Bombeo de $Q_{\text{máximo_inicial}} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (se visualiza en la FIGURA 7) a $Q_{\text{máximo_final}} = 3.26 \text{ m}^3/\text{s}$ (se visualiza en la FIGURA 8), para que la red no sufra una caída de presión.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

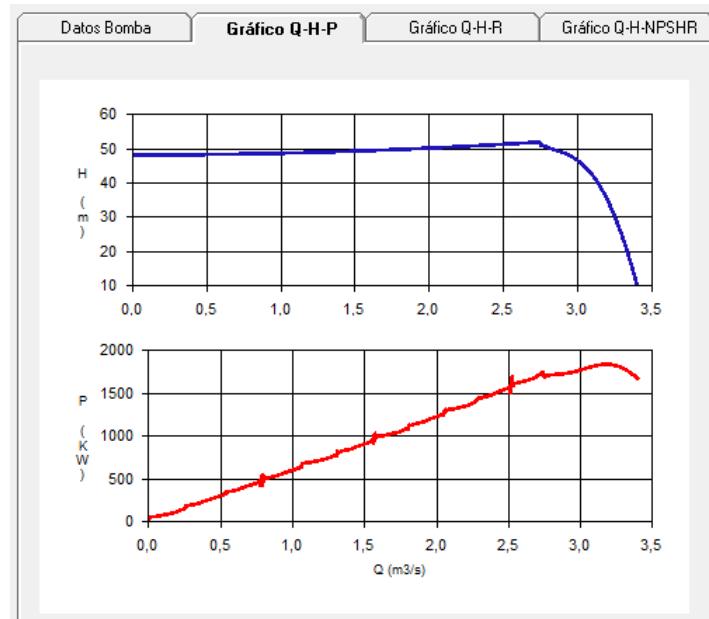


FIGURA 7. Curvas características de altura de impulsión y de potencia consumida de la Estación de Bombeo.

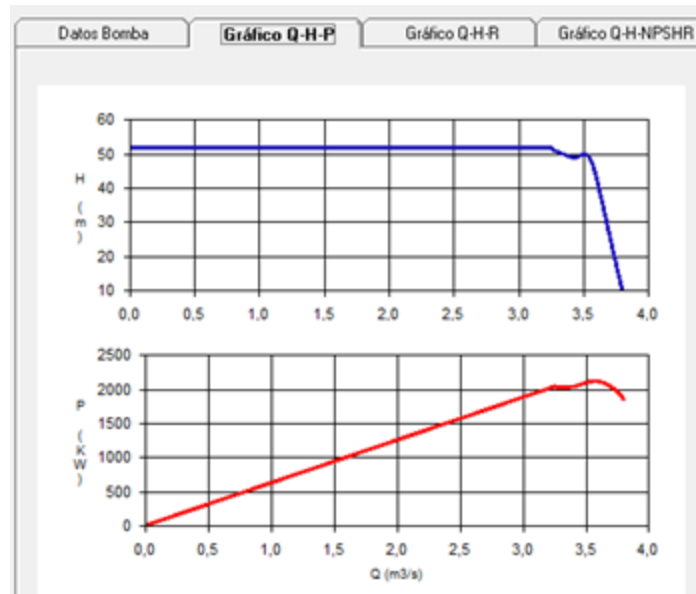


FIGURA 8. Curvas características de altura de impulsión y de potencia consumida de la Estación de Bombeo reformada.

La modificación de la Estación de Bombeo es realista, puesto que se pueden añadir variadores a todos los grupos de impulsión para aumentar la capacidad de bombeo de la red con buen rendimiento y modular los niveles de presión.

4.5.- RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Mediante las diferentes simulaciones se ha obtenido un modelo de la red, donde los hidrantes con mayores necesidades de presión riegan en 8 horas.

También se puede extraer la información que aporta la TABLA 6, que describe los hidrantes críticos que han sido modificados como resultado del análisis hidráulico, y que a pesar de ello continúan siendo críticos, esto se debe a que están situados en las cotas más altas de la red, el problema se solucionará aplicando las herramientas de organización óptima de peticiones de riego en el apartado siguiente.

HIDRANTE CRÍTICO	COTA (m)	PRESIÓN DE CONSIGNA (m)	MARGEN DE PRESIÓN (m)	ETAPA APLICADA	TIEMPO DE RIEGO (h)
H141	310,46	50	-4,19	C y D	8
H52	323,44	50	-4,01	A	8
H157	308,50	50	-2,89	C y D	8
H1	335,80	50	-2,51	A	8
H152	310,10	50	-2,49	A	7
H162	307,48	50	-2,26	C	8
H39	322,50	50	-2,13	D	8
H133	311,63	50	-1,21	B	8
H3	334,34	50	-0,83	A	8
H11	331,36	50	-0,37	A	8
H5	332,36	50	-0,35	A	8
C38	317,90	40	-0,08	D	8

TABLA 6. Hidrantes que continúan siendo críticos en la red.

5.- OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA RED MODIFICADA

5.1.- INTRODUCCIÓN

La aplicación Gestar posee un conjunto de herramientas (telegestar PRORIEGO) que, mediante algoritmos de inteligencia artificial, (Faci et al. (2016)) son capaces de planificar la demanda de forma óptima. Esto se traduce en que realiza automáticamente la distribución de las peticiones de riego, dentro del intervalo disponible, de manera optimizada, en el sentido de que cuando el riego se efectúe, se garantice presión suficiente en el hidrante, además de mínimos costes energéticos.

Hasta este momento, para la red analizada, todas las simulaciones se han efectuado con un solo nivel de presión de la estación de bombeo ($P=50$ mca), sin embargo para la optimización se genera un segundo nivel de presión de bombeo más bajo ($P=40$ mca), para alimentar a los hidrantes más favorables y así conseguir la contratación del término de potencia más bajo en algún periodo.

Para conseguir este objetivo, se seleccionan los hidrantes con necesidades de presión más elevadas y se instruye al sistema OPTIRIEGO para que organice su riego

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

preferentemente por la noche, en tarifa P6, el resto de hidrantes pueden ser acomodados por el algoritmo donde sea necesario, de esta manera se realizan las optimizaciones con la puesta en funcionamiento de la Estación de Bombeo de alta presión (50 mca) por la noche y la puesta en funcionamiento de la Estación de Bombeo a baja presión (40 mca) durante el resto de la franja de día necesaria para cubrir la demanda de riego. Este proceso se repite para cada día tipo de la campaña, durante los meses con un valor de demanda de agua lo suficientemente significativo como para que su análisis aporte datos relevantes al estudio, esto se produce en el intervalo de meses comprendido entre marzo y octubre, como se puede observar en el Capítulo 3.1 del Anexo 2. En la FIGURA 9 se pueden diferenciar los dos niveles de consumo de caudal de la red en el mes de mayor demanda, tal y como se ha expresado se produce un mayor consumo en las horas nocturnas.

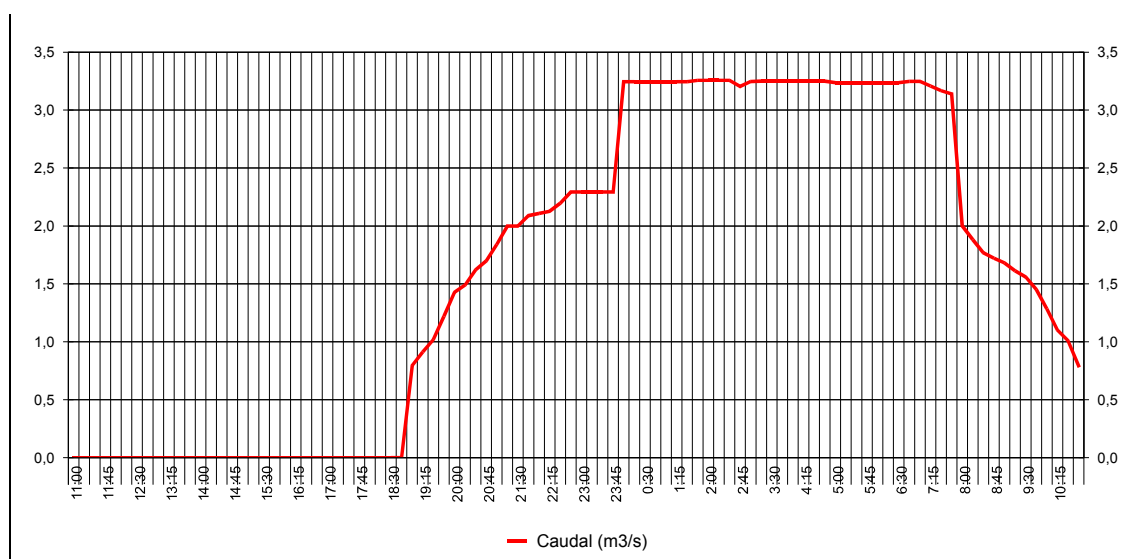


FIGURA 9. Caudales de la estación de bombeo.

En el eje horizontal de la FIGURA 9 se visualiza el tiempo total de la optimización (un día), segmentado en intervalos de 15 minutos. En todos los procesos de programación de riegos valorados en el estudio, tanto el intervalo como el tiempo total de la optimización es el mismo.

5.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS OPTIMIZACIONES

Como resultado de estudiar la estrategia más favorable, según el consumo del mes y la estructura de tarifas correspondiente, eligiendo los periodos más favorables, se programan los riegos optimizados siguiendo los criterios que se resumen en la TABLA 7, los resultados obtenidos en cada una de las optimizaciones se detallan en el Capítulo 3 del Anexo 2.

Meses analizados	Franja horaria de riego		Tarifa aplicada		Consumo necesario (m ³ /ha día)
	Estación de Bombeo funciona a Alta Presión	Estación de Bombeo funciona a Baja Presión	Estación de Bombeo funciona a Alta Presión	Estación de Bombeo funciona a Baja Presión	
Marzo	De 0h a 2h	De 2h a 8h	P6	P6	6,99
Abril	De 0h a 3h	De 3h a 8h	P6	P6	22,60
Mayo	De 0h a 6h	De 6h a 16h	P6	P6 de 6h a 8h y P5 el resto	49,42
Primera quincena de junio	De 0h a 8h	De 8h a 9h y de 15h a 24h	P6	P4	69,98
Segunda quincena de junio y julio	De 0h a 8h	De 8h a 11h y de 19h a 24h	P6	P2	69,98
Agosto	De 0h a 4h	De 4h a 16h	P6	P6	27,38
Septiembre	De 0h a 2h	De 2h a 8h	P6	P6	26,67
Octubre	De 0h a 1h	De 1h a 8h	P6	P6	7,17

TABLA 7. Resumen de las características de las optimizaciones según meses.

En la TABLA 7 se observa que se han conseguido realizar optimizaciones de todos los meses en los que el riego de alta presión solo se encuentra activo en tarifa P6, otro aspecto importante a destacar es que en ninguno de los procesos de programación de riego se encuentra en funcionamiento el sistema en la tarifa P1, por lo tanto no se deberá contratar esta tarifa.

La programación de riego más crítica es la del mes de julio, por los siguientes motivos:

- Es el mes junto con junio de mayor consumo de agua, por lo tanto será el mes de mayor consumo eléctrico. (Véase TABLA 7)
- Al mes de julio se le aplica tarifa P1 8 horas del día, y tarifa P2 otras 8 horas, por lo tanto es el mes con menos horas baratas de riego. (Véase FIGURA 1)
- Es el único mes en el que la estrategia optimizada utiliza la tarifa P2. (Véase TABLA 7)

Al ser la programación de riego más crítica, el análisis de los de los picos de potencia de este mes (FIGURA 10), proporciona el valor de potencia que se debe contratar en los periodos P2 y P6, el hecho de establecer el valor de potencia para P2 implica que en P3, P4 y P5 se deba contratar como mínimo esta potencia, por lo tanto a partir del análisis del mes de julio, se obtiene el valor de potencia que se debe contratar

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

todo el año, por este motivo la programación de riego del mes de julio es la primera que se debe realizar.

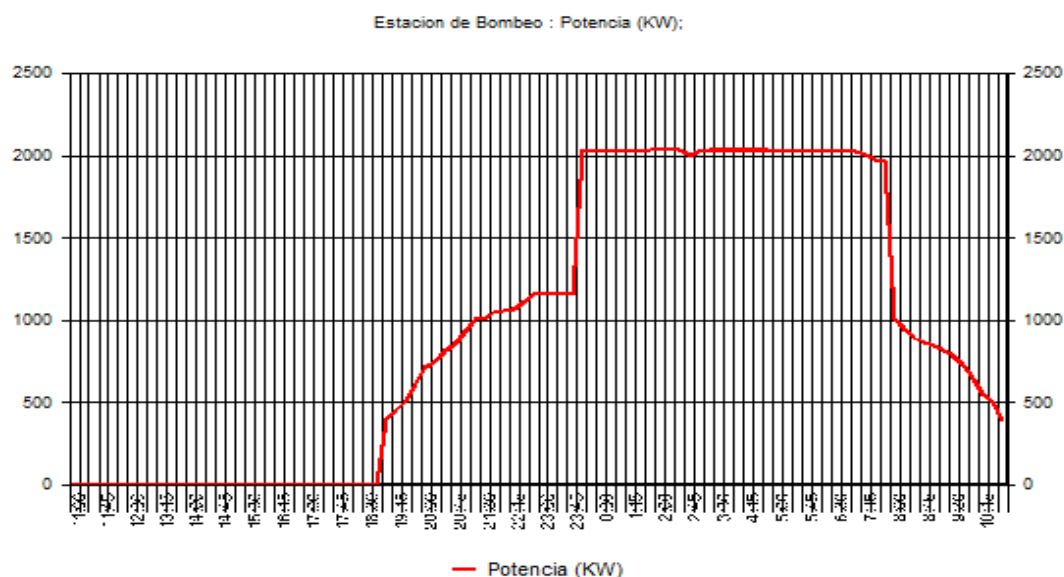


FIGURA 10. Potencia en la estación de bombeo, en el riego optimizado en el mes de julio.

6.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se compara la predicción de gastos energéticos que se han obtenido en el Capítulo anterior, en que se efectúa el riego con gestión optimizada, con el caso en el que el riego se efectúa la demanda (que es como actualmente funciona la red en cuestión).

La predicción de gastos energéticos operando a la demanda se realiza mediante simulaciones de jornadas completas de riego a la demanda (generadas automáticamente por una funcionalidad específica existente en el programa GESTAR) para cada mes de la campaña, actuando únicamente la Estación de Bombeo con alta presión y sin regar por la noche, puesto que la situación actual es que los regantes prefieren regar durante el día.

6.1.- ANÁLISIS DE LOS COSTES DE ENERGÍA

La TABLA 8 se obtiene a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones del riego a demanda. El coste total anual del gasto de consumo energético en estas simulaciones, es de 281.172 €, siendo este valor la suma de todos los costes de consumo de energía mensuales. En el Capítulo 3.1 del Anexo 2, se pueden visualizar los resultados que genera la aplicación GESTAR mes a mes.

	RIEGO A DEMANDA		
	Coste de consumo de energía diario (€)	Coste de consumo de energía mensual (€)	Coste unitario de la energía (€/m ³)
Marzo	220,52	6.615,60	0,01610
Abril	615,60	18.468,00	0,01400
Mayo	1.408,00	42.240,00	0,01400
Primera quincena de Junio	2.256,80	33.852,00	0,01600
Segunda quincena de junio y julio	3.065,90	137.965,50	0,02180
Agosto	629,24	18.877,20	0,01100
Septiembre	547,59	16.427,70	0,01599
Octubre	224,20	6.726,00	0,01407

TABLA 8. Costes de energía en riego a demanda.

La TABLA 9 se obtiene a partir de los resultados obtenidos en las programaciones del riego optimizado. El coste total anual del gasto de consumo energético en estas programaciones es de 187.164 €, siendo este valor la suma de todos los costes de consumo de energía mensuales. En el Capítulo 3.1 del Anexo 2, se pueden visualizar los resultados que genera la aplicación GESTAR mes a mes.

	RIEGO OPTIMIZADO		
	Coste de consumo de energía diario (€)	Coste de consumo de energía mensual (€)	Coste unitario de la energía (€/m ³)
Marzo	150,97	4.529,10	0,00926
Abril	417,33	12.519,90	0,00930
Mayo	1.095,00	32.850,00	0,01079
Primera quincena de junio	1.670,70	25.060,50	0,01179
Segunda quincena de junio y julio	1.811,70	81.526,50	0,01278
Agosto	536,03	16.080,90	0,00929
Septiembre	327,55	9.826,50	0,00929
Octubre	159,04	4.771,20	0,00925

TABLA 9. Costes de energía en riego optimizado.

Se observa un elevado ahorro energético en la red mejorada (mediante aumento de dotaciones de hidrantes y diámetros de tuberías) y con riegos gestionados de forma óptima. Esto se debe a que al disponer de un riego supervisado, no solo se logra ahorro por contratar menos potencia en periodos más caros, sino que también se consigue ahorro en el consumo de energía, debido a que OPTIRIEGO organiza el riego para que el máximo de hidrantes rieguen en la tarifa barata.

Visualizando los resultados de las TABLAS 8 y 9, se obtienen características de los meses analizados, que generan conclusiones interesantes. Los detalles que se aprecian son:

- En marzo no se refleja una gran diferencia del gasto energético en los dos tipos de riego, a pesar de que las tarifas energéticas no son en todo momento favorables, la causa es que al corresponder a un mes de escasa demanda de riego, la red no consume mucha energía.
- En los meses de junio y julio se detecta mucha desigualdad de gasto energético entre los dos tipos de riego, las causas son la gran demanda de riego y las nada favorables tarifas energéticas.
- En agosto no se refleja una gran diferencia del gasto energético en los dos tipos de riego, a pesar de que la demanda de riego es notable, la causa es que las tarifas energéticas son las más favorables.

A partir de estos detalles, se deduce que la adecuada gestión del riego es un elemento muy importante para conseguir un ahorro energético, puesto que en los meses más desfavorables, se registran las ventajas económicas que ofrece la gestión del riego más elevadas.

6.2.- ANÁLISIS DE LOS COSTES DE POTENCIA CONTRATADA

Las necesidades máximas de potencia se producen en el mes de julio, debido a que es el mes de máximas necesidades y de menos horas de uso del bombeo, por lo tanto al analizar la FIGURA 10, que describe el consumo de potencia en la estación de bombeo en el mes de julio para el riego optimizado, se observan dos picos de potencia distintos, uno en el periodo de tarifa P6 y otro en el periodo de tarifa P2, este hecho permite la contratación de dos valores de potencia en el riego optimizado.

Para la contratación de potencia en la demanda, se analiza la FIGURA 10 (en el Capítulo 3.1 del Anexo 2 se realiza un análisis más detallado de la contratación de potencia) que describe el consumo de potencia en la Estación de Bombeo en el mes de julio para el riego a demanda y se observa un solo valor de potencia, que es el que se debe contratar en todos los periodos.

TARIFA 6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
€/kW y año	39,139	19,586	14,334	14,334	14,334	6,540
kW Contratados Demanda	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650
kW Contratados Optimizado	0	1.250	1.250	1.250	1.250	2.110
Coste Potencia Demanda (€)	64.580,05	32.317,98	23.651,39	23.651,39	23.651,39	10.791,29
Coste Potencia Optimizada (€)	0,00	24.483,32	17.917,72	17.917,72	17.917,72	13.799,77

TABLA 10. Costes anuales derivados de la contratación de potencia según el período necesario.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

A resultados de lo reflejado en la TABLA 10, se justifica la importancia de una buena organización de los hidrantes críticos, puesto que la utilización de dos niveles de bombeo y la concentración de riegos nocturna permite en la práctica disminuir la potencia contratada en períodos más caros.

6.3.- ANÁLISIS DE LA AMORTIZACIÓN DE LOS CAMBIOS PROPUESTOS

En este capítulo se van a analizar 2 situaciones, para cuantificar el periodo de amortización de los sobrecostes inducidos (cambios en las tuberías), al introducir las técnicas de gestión de la demanda para el ahorro energético.

Para el estudio, se necesita el coste total anual de la energía estimada, para cada uno de los métodos de riego, que se recoge en la TABLA 11, y el ahorro total anual que se consigue al organizar el riego, que se recoge en la TABLA 12.

COSTE TOTAL DEL TÉRMINO DE ENERGÍA (€)	A DEMANDA	281.172,00
	OPTIMIZADA	187.164,60
COSTE TOTAL DEL TÉRMINO DE POTENCIA (€)	A DEMANDA	178.643,51
	OPTIMIZADA	92.036,26
COSTE TOTAL ANUAL (€)	A DEMANDA	459.815,51
	OPTIMIZADA	279.200,86

TABLA 11. Resultados obtenidos de los costes en los dos tipos de riego.

AHORRO (€)	DE ENERGÍA	94.007,40
	DE POTENCIA	86.607,25
	TOTAL	180.614,65
	%	39,28

TABLA 12. Ahorro generado de la red optimizada.

6.3.1.- Situación 1: Amortización de las reformas insertando tuberías en paralelo.

Para efectuar los cambios que son necesarios acometer para la gestión de la demanda, se puede llevar a cabo la instalación de tuberías en paralelo en cada una de las tuberías que es necesario ampliar, de manera que se consiga la misma capacidad de transporte que la que tendría el tramo de conducción con el diámetro asignado según el Capítulo 4.4 de la Memoria, combinando la tubería existente con la nueva tubería en paralelo. De esta forma se consigue que la reforma propuesta para la red, no suponga la retirada de las tuberías instaladas.

Modelización y optimización de los costes energéticos en sistemas de distribución de agua para riego a presión.

Se utiliza la terminología que se describe a continuación, para aplicarla en el procedimiento creado.

D0= Diámetro interior asignado en el Capítulo 4.4 de la Memoria del proyecto para la mejora de la capacidad de transporte de la red.

D1=Diámetro interior actual de la red.

D2=Diámetro interior hidráulico necesario de la tubería adicional paralela.

El procedimiento que se debe seguir en cada tramo modificado de tubería es el siguiente:

- 1- Calcular D2 aplicando la expresión 8 que se localiza en el Capítulo 4.1 del Anexo 2.
- 2- Hallar el diámetro normalizado (diámetro nominal) más próximo a D2, siempre manteniendo las características de timbraje y material iniciales de la tubería, esto se consigue a través de la base de datos de la aplicación GESTAR, que también proporcionara el precio por metro lineal de la tubería para el DN deseado.
- 3- Calcular el coste del tramo de tubería multiplicando la longitud del tramo por el precio por metro lineal.
- 4- Calcular el coste real aproximado del tramo de tubería, aumentando un 10% el coste del tramo de tubería, se debe realizar este cálculo para obtener un coste más realista de la inversión, puesto que para conseguir la red deseada se deben realizar tareas tales como cortar la tubería, añadir un codo de unión, excavar una zanja...etc.

Aplicando el procedimiento en todas las tuberías modificadas, se obtiene el coste de la inversión necesario para generar la red mejorada, siendo esta inversión la suma de todos los costes calculados en el punto 3 del procedimiento. En el Capítulo 4.1 del Anexo 2, se recogen todos los cálculos realizados, dando como resultado una inversión de **923.042,34 €**.

El número de años que supone recuperar la inversión que se recomienda realizar, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Años de recuperación de la inversión} = \frac{\text{Coste de la inversión}}{\text{Ahorro generado}} = \frac{923.042,34}{180.614,65} = 5 \text{ años y } 1 \text{ mes}$$

El resultado obtenido es bueno, puesto que los plazos de recuperación de la inversión para una red de estas características no son muy altos.

6.3.2.- Situación 2: Amortización de la red en fase de diseño.

Para justificar la necesidad de realizar en fase de proyecto un diseño correcto y adecuado a la gestión posterior de la red, orientada al ahorro de costes energéticos, se contabilizan los sobrecostes de la red respecto a un proyecto tradicional de una red para operar a la demanda.

Como se ha visto a lo largo de la memoria del proyecto, se han realizado cálculos sobre una red en funcionamiento, que no contempló la gestión optimizada, y que por tanto no dispone de una red de tuberías capaz de encajarla

Si en la fase de diseño de la red se hubiesen considerado estas técnicas de gestión para el ahorro energético, se habría producido un sobrecoste inicial debido a que las tuberías necesarias son mayores que las que se encuentran en funcionamiento hoy en día.

El sobrecoste inicial se calcula de la siguiente manera:

- 1- Se calcula el coste que supuso en su día instalar las tuberías que se deben cambiar, es decir sin las modificaciones efectuadas a lo largo de las simulaciones, de esta manera se consigue un cálculo de lo que se gastó en el momento de la construcción de la red de riego. Como se ha comentado en el caso anterior, la aplicación GESTAR posee una base de datos que proporciona el precio por metro lineal de la tubería deseada. Utilizando este valor y la longitud requerida para cada tramo, se obtiene el coste total de la inversión realizada por la Comunidad de Regantes, que asciende a **899.180,55 €**.

Los cálculos se recogen en el Capítulo 4.2 del Anexo2.

- 2- Se calcula el coste que supone la instalación de las tuberías ampliadas en la mejora de la red, siguiendo el mismo procedimiento que en el punto anterior, se obtiene un coste total de inversión optimizada de **1.394.707,16 €**.

Los cálculos se recogen en el Capítulo 4.2 del Anexo2.

- 3- La diferencia entre el coste total de inversión optimizada y el coste total de inversión realizada es el valor del sobrecoste inicial, que asciende a **495.526,60 €**.

Teniendo en cuenta que el ahorro anual es el mismo que el referenciado en la TABLA 12, los años de recuperación de la inversión se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Años de recuperación de la inversión} = \frac{\text{Sobrecoste inicial}}{\text{Ahorro generado}} = \frac{495.526,60}{180.614,65} = 2 \text{ años y } 9 \text{ meses}$$

El resultado obtenido refuerza la idea de que se recomienda considerar en la fase de diseño las estrategias expuestas de ahorro de costes energéticos, puesto que en pocos años se amortiza la inversión adicional inicial que suponen.

7.- CONCLUSIONES

Con el trabajo realizado se ha conseguido introducir una metodología racional y sistemática que permite reducir los costes energéticos en las redes colectivas de riego con bombeo directo existentes. Asimismo esta metodología se ha validado con la aplicación a un caso tipo de gran complejidad que ha permitido ilustrar el procedimiento y verificar su eficacia.

Se han identificado las reformas necesarias en la infraestructura para posteriormente establecer las pautas de gestión necesarias para que en esa configuración se produzcan ahorros energéticos.

Se ha conseguido demostrar que si en la fase de diseño de la red de riego, se tienen en cuenta estrategias de gestión orientadas al ahorro de costes energéticos, la mayor inversión inicial requerida se amortiza rápidamente, y se consigue un importante ahorro permanente en dichos costes energéticos anuales que en el caso analizado asciende al 39%.

Asimismo se ha proporcionado para la explotación del sistema los siguientes elementos:

- Disponibilidad de un modelo completo e integrado de las instalaciones hidráulicas del Sector XI del Flumen que puede ser usado de múltiples formas en la gestión diaria y planificación estratégica, y en la definición de ulteriores reformas.
- Identificación de los hidrantes más críticos de la red. Por lo tanto en la práctica pueden valorar la posibilidad de modificar el riego por aspersión a riego por goteo en tales hidrantes, debido a que la utilización de esta técnica requiere menos presión en el hidrante.

Para finalizar, me gustaría poner de manifiesto que el trabajo realizado me ha aportado personalmente experiencia en el sector agrícola, llegando a entender la problemática existente en este sector, puesto que para implantar técnicas modernas se deben realizar inversiones, que repercuten directamente en el agricultor, consecuencia de esto es que muchas de las propuestas de modernización se pierden.

8.- BIBLIOGRAFÍA

De Palma Manglano J.V (2016) “*Estado actual de la Modernización de los Regadíos en España y perspectivas de futuro*”. Valencia, Junio 2016.

Faci E., Seral P., Zorrila F., Garcia A., Aliod R., García S. (2016) “Metodología para la optimización conjunta de la programación de riego y estaciones de bombeo en bombeos directos”. XXXIII Congreso Nacional de Riegos. Sevilla 2016.

González C., Aliod R., Estrada C., Pano J. (2009) “*improved pressurized pipe network hydraulic solver for applications in irrigation systems*”. Ref. [Int Journal of Irrigation and Drainage, Volumen: 135, nº 4, Páginas, 421, 430], Agosto 2009.

Proexport (2008) “La elevación de las tarifas eléctricas dispara el precio del agua”. [Ref. Boletín de junio-julio]. Disponible en <http://www.proexport.es>.

Yusta Loyo J. M. (2014) “*Un poco de luz sobre el precio de la electricidad en España*”. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza, Febrero 2014.